

УДК 630\*372:630\*377.2

**П. А. Протас, С. П. Мохов, А. О. Шошин**

Белорусский государственный технологический университет

**АНАЛИЗ МЕТОДИК ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРОВЕСА НЕСУЩЕГО КАНАТА  
ОДНОПРОЛЕТНЫХ ТРЕЛЕВОЧНЫХ УСТАНОВОК**

Один из важнейших параметров канатных трелевочных установок, который важно учитывать при ведении лесозаготовительных работ, – это провес несущего каната. Данный параметр во многом определяет условия эксплуатации такого вида оборудования. Лесозаготовитель при использовании канатных трелевочных установок должен решать одновременно несколько задач. С одной стороны, для получения прибыли и выполнения плановых показателей установка должна обладать значительной производительностью, которая в свою очередь в большей степени зависит от объема трелеваемой пачки. В то же время с увеличением объема пачки для обеспечения необходимого провеса несущего каната возрастает усилие натяжения на барабане лебедки. В условиях горных лесозаготовок возможно уменьшение усилия натяжения без уменьшения эффективности работы установки. Для равнинных условий Беларуси с целью уменьшения усилия натяжения каната необходима установка промежуточных опор, что требует дополнительных трудозатрат. В этой связи более актуальным является учет провеса несущего каната. При большой вариативности конструкций канатных трелевочных установок целесообразно иметь достаточно точную методику определения провеса несущего каната. Это позволит еще на стадии выбора оборудования определять наиболее эффективные установки для эксплуатационных условий Республики Беларусь.

**Ключевые слова:** канатная установка, провес, несущий канат, усилие натяжения, трелевка, метод параболы.

**P. A. Protas, S. P. Mokhov, A. O. Shoshin**

Belarusian State Technological University

**ANALYSIS METHODS FOR DETERMINING DEFLECTION  
OF THE CABLE SINGLE-SPAN LOGGING INSTALLATION**

One of the most important parameters of cable logging systems, which is important to take into account in the conduct of logging operations, is deflection of the cable. This parameter largely determines operating conditions of this type of equipment. Loggers at the is-use cable logging systems must solve several problems at once. On the one hand, to make a profit and performance targets the installation must have a large capacity, which in turn is largely dependent on the amount of trelying packs. At the same time with an increase in volume of the pack to provide the desired deflection of the cable increases the tension force on the winch drum. In terms of mountain logging is possible to reduce the tensile force without reducing the efficiency of the unit. For lowland conditions in Belarus in order to reduce the rope tension force necessary to install intermediate supports, which requires additional effort. In this regard, more relevant to the accounting of the cable deflection. When a large variability of designs cable logging systems it is advisable to have a fairly accurate method for determining the deflection of the cable. This will allow additional equipment selection stage to determine the most effective settings for operating conditions of the Republic of Belarus.

**Key words:** cable installation, slack, carrying rope, tensile force, skidding, the parabola method.

**Введение.** В Республике Беларусь ежегодно увеличиваются объемы заготовки древесины по главному и промежуточному пользованию. За 2015 год предприятиями, входящими в структуру Министерства лесного хозяйства, концерна «Беллесбумпром», Управления делами Президента, а также частными компаниями по всем видам пользования было заготовлено около 19,1 млн. м<sup>3</sup> древесины. При этом ежегодно лесосечный фонд недоосваивается на 5–10%, преимущественно это насаждения ольхи черной, в меньшей степени березы и сосны,

растущих на оторфованных и болотных почвах. Такие лесосеки могут разрабатываться имеющимися системами машин преимущественно зимой при устойчивых отрицательных температурах либо сухим летом с уменьшением сменной производительности оборудования.

Перспективным направлением для разработки заболоченных лесосек является применение мобильных канатных трелевочных установок на базе лесных модификаций сельскохозяйственных тракторов. Минским тракторным заводом создана экспериментальная установка МТК-431

на базе трактора «Беларус 1221Л». Данная установка имеет двухбарабанную лебедку с тяговым усилием  $2 \times 50$  кН и мачту, смонтированную на задней навеске трактора, высотой 4 м. Максимальное расстояние трелевки 200 м. При этом эксплуатационные параметры данной установки до сих пор остаются неизученными. Одним из важнейших параметров канатных трелевочных установок является провес несущего каната, величина которого оказывает непосредственное влияние на высоту расположения блоков головной и тыловой мачты и, следовательно, на трудозатраты на монтаж/демонтаж вспомогательного оборудования.

**Основная часть. Определение провеса несущего каната.** Анализ мобильных канатных установок на базе трактора для трелевки древесины зарубежного производства, таких как Koller, Konrad, Ritter, Larix и др., показал, что их технические характеристики сопоставимы с характеристиками отечественной машины МТК-431. Однако в подавляющем большинстве случаев такое оборудование используется для заготовки древесины в горной и сильнохолмистой местности, с установкой тыловой мачты высотой 10–15 м и устройством промежуточных опор. При этом провес несущего каната в большинстве случаев может достигать значительных величин без нарушения правил безопасности и технологии работ. Для условий лесозаготовок страны характерны малые размеры лесосек и, как следствие, относительно небольшие средние расстояния трелевки, разбросанность отведенного в рубку лесфонда, а для заболоченных лесосек еще и выход грунтовых вод на поверхность. В связи с этим целесообразно при использовании канатных трелевочных установок (в том числе МТК-431) для разработки труднодоступного лесфонда страны стремиться к уменьшению трудозатрат на монтажно-демонтажные работы. В частности, устройству промежуточных опор при монтаже установки необходимо предусматривать только в исключительных случаях (при значительной разнице высот между мачтами, наличии значительных возвышенностей между опорами). В то же время увеличение расстояния пролета напрямую связано с увеличением усилия натяжения несущего троса и уменьшением рейсовой нагрузки. Согласно вышесказанному, на практике важно иметь достоверный метод определения провеса каната, позволяющий получать его значения в узком диапазоне.

Важный вопрос, который должен учитываться для каждой канатной трелевочной установки, – это обеспечение достаточного усилия натяжения несущего каната, при котором его провес позволял бы беспрепятственно и без-

опасно перемещать лесоматериалы по волоку. Исходя из высоты оставляемых пней и других препятствий на лесосеке, рельефа местности, в процессе полуподвесной трелевки лесоматериалы должны быть приподняты за вершину или комель (хлысты, деревья) и за торец (сортименты) на высоту не менее 1–1,5 м.

В источнике [1, с. 46] предлагается для установок с малым пролетом до 100 м принимать провес загруженного несущего каната 10–20%, а для больших пролетов 4–5% от величины пролета. Далее по тексту этот метод нахождения провеса будем называть упрощенным. Использование упрощенного метода расчета провеса в долях от величины пролета освобождает от сложных вычислений, однако при этом остается вопрос о назначении провеса для установок со значениями пролета, близкими к 100 м. В [1] приводится два диапазона пролета при назначении провеса каната: до 100 м и больше 100 м. Формулировку «больше 100 м» [1] логично понимать как «все значения пролетов больше 100». В такой ситуации при разнице между расстояниями пролета двух сравниваемых значений (например, 99 м и 101 м) будут приниматься коэффициенты провеса 10–20% и 4–5% соответственно. Для таких расстояний между опорами значения провеса находятся в диапазоне 9,9–19,8 м и 4,04–5,05 м соответственно. Как видно из данного примера, различие между данными значениями существенное, с учетом того, что величины пролета различаются на 2 м.

Метод упрощенного определения провеса несущего каната в зависимости от величины пролета исключает сложные расчеты. Он удобен при работе канатных установок в условиях, когда провесом можно пренебречь по причине больших перепадов высот между высотой расположения мачт и центральной точки пролета. При этом необходимо отметить, что при использовании канатных установок с большим усилием натяжения несущего каната (100–120 кН) и значительной массой груза (2–3 т) возможно достичь одинаковых значений провеса по сравнению с установками с усилием натяжения несущего каната 20–30 кН и максимальной массой трелеваемой пачки 1 т. С учетом вышесказанного очевидно, что без учета усилия натяжения несущего каната, которое может создаваться лебедкой, будут встречаться значительные неточности при определении провеса упрощенным методом, негативно сказывающиеся на качестве и безопасности выполняемых трелевочных операций.

В работе [2] приведена методика расчета провеса каната при статической и динамической нагрузке, а также по результатам аппроксимации полученных расчетных данных многопараметрические функции для оценки провеса каната

при нахождении груза в середине пролета (т. е. максимального значения), выраженного в процентах от длины пролета:

– при статической нагрузке

$$F = (-0,0202\varphi^2 + 0,291\varphi + 36,166) \frac{G^{0,385}}{d_k^{0,790}};$$

– при динамической нагрузке

$$y_{\max} = (-0,00013\varphi^2 + 0,00184\varphi + 0,228) \times \frac{G^{0,433} \cdot l \cdot \exp(0,162v)}{d_k^{0,751}},$$

где  $\varphi$  – угол наклона каната, град.;  $G$  – масса груза, т;  $d_k$  – диаметр каната, мм;  $y_{\max}$  – вертикальное перемещение груза при его движении, м;  $l$  – длина пролета, м;  $v$  – скорость перемещения груза, м/с.

По данным профессора Дукельского [3], провес каната под действием собственного веса и единичной сосредоточенной нагрузки может быть найден по методу цепной линии и методу параболы. Метод цепной линии является более точным, но в то же время трудоемким по сравнению с методом параболы. В отличие от метода цепной линии, при использовании метода параболы делается допущение, что погонный вес каната считается равномерно распределенным по хорде пролета, а не по длине кривой каната [3]. При этом расчеты по методу цепной линии дают незначительно большие значения провеса по сравнению с методом параболы. Отличие между значениями в расчетах по этим двум методам составляет 1,75–5% для пролетов порядка 1000 м, а расхождения значений для расстояний трелевки 100–200 м будут иметь еще меньшую погрешность [4].

В данной работе выполнены расчеты только по методу параболы.

Провес каната в любой точке пролета от действия собственного веса и единичной со-

средоточенной нагрузки при использовании метода параболы определяется по формуле (1) [3, с. 60]:

$$f_x = \frac{q \cdot x \cdot (l-x)}{2 \cdot H \cdot \cos \beta} + \frac{Q \cdot x \cdot (l-x)}{H \cdot l},$$

где  $q$  – вес 1 погонного метра несущего каната, Н;  $x$  – расстояние от точки определения провеса каната до ближайшей опоры, м;  $l$  – величина пролета канатной установки (в статье рассматриваются однопролетные установки), м;  $H$  – горизонтальная составляющая натяжения несущего каната, Н;  $\beta$  – угол наклона хорды пролета установки относительно горизонтальной линии, град;  $Q$  – вес единичного груза в произвольной точке, Н.

Схема определения провеса несущего каната под действием собственного веса и сосредоточенной нагрузки по [3] приведена на рисунке.

Для оценки величины погрешности между расчетами по упрощенному методу и по формуле (1) были выполнены вычисления величин провеса несущего каната под действием собственного веса и сосредоточенного груза, результаты которых приведены в таблице.

При сравнении с базовой машиной МТК-431 были выбраны установки, сопоставимые с отечественной по усилию натяжения несущего каната (35–50 кН) и максимальному расстоянию трелевки (100–200 м) – Ritter KSK-3 S70 и Larix Kombi H.

Значения провеса в таблице для различных величин пролета (расстояний между головной и тыловой мачтой) соответствуют максимально-му отклонению от хорды (на середине ее длины), проведенной из вершин опор. Для всех установок масса груза принималась 1 т, угол между горизонтальной линией и хордой несущего каната принимался 5 градусов, расчеты проводились для условий без установки промежуточных опор.

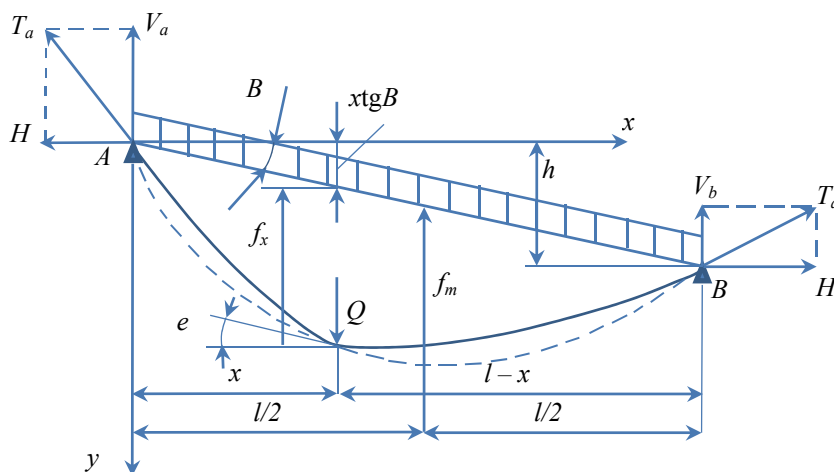


Схема провеса несущего каната от собственного веса и груза

## Провесы несущего каната на середине пролета и погрешности его измерения

Пролет, м	Расчет провеса на середине пролета по упрощенной методике		Расчет провеса на середине пролета по методу параболы	Погрешность	
	диапазон, м	среднее, м		абсолютная, м	относительная, %
	10–20%				
МТК-431					
20	2–4	3	1,01	1,99	197,02
40	4–8	6	2,03	3,97	195,56
60	6–12	9	3,07	5,93	193,15
80	8–16	12	4,13	7,87	190,55
100	10–20	15	5,2	9,8	188,46
Пролет, м	4–5%				
120	4,8–6	5,4	6,29	0,89	14,1
140	5,6–7	6,3	7,39	1,09	14,7
160	6,4–8	7,2	8,51	1,31	15,4
180	7,2–9	8,1	9,65	1,55	16,1
200	8–10	9,0	10,8	1,8	16,7
KSK-3 S 70 Ritter					
Пролет, м	10–20%				
20	2–4	3	1,26	1,74	138
40	4–8	6	2,53	3,47	137
60	6–12	9	3,81	5,19	136
80	8–16	12	5,1	6,9	135
100	10–20	15	6,41	8,59	134
Larix Kombi H					
Пролет, м	10–20%				
20	2–4	3	1,44	1,56	108,33
40	4–8	6	2,9	3,1	106,9
60	6–12	9	4,39	4,61	105,01
80	8–16	12	5,9	6,1	103,39
100	10–20	15	7,43	7,57	101,88
Пролет, м	4–5%				
120	4,8–6	5,4	8,98	3,58	39,87
140	5,6–7	6,3	10,56	4,26	40,34
160	6,4–8	7,2	12,16	4,96	40,79
180	7,2–9	8,1	13,79	5,69	41,26
200	8–10	9,0	15,43	6,43	41,67

Как видно из таблицы, для пролетов до 100 м относительная погрешность расчетов провеса для всех трех установок находится в диапазоне от 100 до 200%, что указывает на то, что для таких расстояний трелевки точности укрупненного расчета в процентах от величины пролета для практических целей недостаточно. Для пролетов от 100 м относительная погрешность меньше и принимает значения в диапазоне от 14 до 45%, что также недостаточно для применения на практике упрощенного метода. Как для пролетов до 100 м, так и более наблюдается неоднородная тенденция погрешности определения провеса несущего каната. Для всех трех установок характерно незначительное снижение относительной погрешности определения провеса при увеличении расстояния между опорами для пролетов до 100 м. В то же время для установок Larix Kombi H и МТК-431 характерно незначительное увеличение относительной погрешности определения провеса несущего каната на середине пролета.

Анализ данных таблицы и формулы (1) показал, что провес каната напрямую нельзя связывать с расстоянием пролета, при этом в значительной степени его можно регулировать изменением усилия натяжения несущего каната. В данном исследовании было сделано допущение, при котором провес между опорами определялся как для небольших расстояний 50–100 м, так и вплоть до 340 м. На практике такие большие значения провеса, которые были получены для установки Larix Kombi H в 20–27 м, без установки промежуточных опор могут быть в ситуации, когда несущий канат натянут между двух природных возвышенностей и древесина заготавливается в низине на несколько десятков метров ниже линии несущего каната.

**Заключение.** Для организации эффективного и безопасного процесса трелевки на заболоченных лесосеках страны при относительно небольшой высоте установки головных и тыловых мачт (4–7 м) важно иметь достоверную

информацию о значении провеса несущего каната. Согласно [5], крутизна склонов больше 15 градусов для территории Республики Беларусь составляет 2,9% от общей площади лесных площадей, поэтому для равнинных лесосек с уклоном до 15 градусов в формуле (1) возможно пренебречь косинусом угла наклона хорды. Все остальные составляющие: вес одного погонного метра несущего каната, величина

пролета и расстояние до точки определения величины провеса (фактически середина пролета), горизонтальная составляющая натяжения (для упрощения может приниматься равной максимальному усилию натяжения на барабане лебедки из технической характеристики), вес сосредоточенного груза (определяется из технической характеристики установки) могут быть определены без дополнительных расчетов.

### Литература

1. Рахманов С. И., Гороховский К. Ф., Лившиц Н. В. Основы расчета оборудования лесозаготовок. М.: Лесная промышленность, 1973. 192 с.
2. Жук А. Ю. Повышение эффективности сбора и транспортировки древесины в прибрежных акваториях и береговой зоне водохранилищ: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.21.01. Архангельск, 2016. 34 с.
3. Дукельский А. И. Подвесные канатные дороги и кабельные краны. М.: Машиностроение, 1966. 484 с.
4. Кокая Г. Г. Расчет натяжений несущих канатов канатно-подвесных и воздушно-трелевочных установок // Труды ЦНИИМЭ. 1966. Вып. 71. С. 177–192.
5. Федоренчик А. С., Герман А. А., Протас П. А. Лесные машины «Амкодор». Минск: БГТУ, 2013. 240 с.

### References

1. Rakhmanov S. I., Gorokhovskiy K. F., Livshits N. V. *Osnovy rascheta oborudovaniya lesozagotovok*. [Bases for design of harvesting equipment]. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1973. 192 p.
2. Zhuk A. Yu. *Povyshenie effektivnosti sbora i transportirovki drevesiny v pribrezhnykh akvatorijah i beregovoj zone vodohranilishc: Avtoref. dis. kand. tekhn. nauk* [Improving the efficiency of collection and transportation of timber in the coastal areas and coastal zone reservoirs. Abstract of thesis cand. of techn. sci.], Arhangelsk, 2016. 34 p.
3. Dukel'skiy A. I. *Podvesnyye kanatnyye dorogi i kabelnyye krany* [Ropeways and cable cranes]. Moscow: Mashinostroeniye Publ., 1966. 484 p.
4. Kokaya G. G. *Raschet natyazheniy nesushchih kanatov kanatno-podvesnyh i vozduшно-trelevochnyh ustanovok. Trudy TSNIIME* [Calculation of tension of the ropeways and aerial cableway], 1966, issue 71, p. 177–192 (In Russian).
5. Fedorenchik A. S., German A. A., Protas P. A. *Lesnyye mashiny «Amkodor»* [Forestry machines «Amkodor»]. Minsk, BGTU Publ., 2013. 240 p.

### Информация об авторах

**Протас Павел Александрович** – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры лесных машин и технологии лесозаготовок. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: Protas77@rambler.ru.

**Мохов Сергей Петрович** – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой лесных машин и технологии лесозаготовок. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: lmitlz@belstu.by.

**Шошин Артем Олегович** – аспирант кафедры лесных машин и технологии лесозаготовок. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: raul777gol@mail.ru

### Information about the authors

**Protas Pavel Alexandrovich** – PhD (Engineering), Assistant Professor, Assistant Professor of the Department of Logging Machinery and Technology. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: Protas77@rambler.ru

**Mokhov Sergey Petrovich** – PhD (Engineering), Assistant Professor, Head of the Department of Logging Machinery and Technology. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: lmitlz@belstu.by.

**Shoshin Artem Olegovich** – PhD student, the Department of Logging Machinery and Technology. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: raul777gol@mail.ru.

Поступила 15.02.2016